

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560451

研究課題名（和文） 数式処理による低次元・高精度な多用途対応型航空機 LFR モデル構築法の開発

研究課題名（英文） A symbolic procedure for construction of multipurpose-oriented aircraft LFR model with low order and high precision

研究代表者

徐 粒 (XU LI)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号：40252324

研究成果の概要（和文）：本研究は、多項式行列基本変換などの数式処理の手法を用いて、条件の変更や用途の違いに応じて複雑さが調整可能な LFR（線形分数表現）モデリングの新技法を考案し、航空制御系の開発効率を向上させることを目的としている。その成果として、符号係数、変動パラメータと独立変数が混在している場合でも、それらを統一的に数式のままで処理できる LFR 実現技法を提案した上、大規模・複雑な航空制御系に適用可能なサイズ分割と変数分離の LFR 実現技法の構築、およびその分割・分離と再合成のための基本アルゴリズムの開発を行った。また、行列基本変換による数式処理可能な LFR モデルの低次元化アルゴリズムも開発した。

研究成果の概要（英文）：In order to improve the development efficiency of aircraft control systems, a new approach for LFR uncertainty modeling has been established by utilizing symbolic techniques, which can generate an LFR model with low order, high precision and can adjust its complexity according to different specifications or purposes. In particular, a constructive LFR realization procedure has first been proposed based on the polynomial matrix elementary operation technique which can treat, in a unified way, all the independent variables, uncertain parameters and the symbolic coefficients in the given uncertain system. Then, methods and the corresponding algorithms for construction of LFR model for a large-scale and complicated system, e.g., an aircraft control system, have been shown by first reducing the original LFR realization problem into several sub-problems with smaller sizes and less dimensions and then combining the results obtained for the sub-problems to achieve the desired overall LFR realization. Finally, an elementary operation approach to order reduction for LFR has also been proposed to obtain an LFR with possibly lower order.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：多次元システム, 線形分数表現 (LFR), 線形分数変換 (LFT), 状態空間実現,

1. 研究開始当初の背景

航空制御系の開発は, 最初の概念的な発案から最後のシステム実現まで, 解析, 設計, シミュレーション, 性能テスト, 故障診断など多岐にわたる極めて複雑な過程であるため, 膨大な労力, コストと時間が必要とされる. いかにかその開発を効率的なものにするかは重要な研究課題であり, これからこの技術分野と市場を先制する鍵となる.

特に, 制御系開発全体の効率を大きく左右するのは, その出発点となるモデリング問題である. 高度や天候, 積載量など多くの不確定要素を持つ航空機に最先端のロバスト制御技術を適用するには, その変動や不確かさをLFR(線形分数表現)で表現(モデリング)することが必要である. しかし, 低次元かつ高精度のLFRモデルを求めることは, 場合によって係数の符号一つが変わると得られるLFRモデルの構造まで変わってしまうほど非線形性の強い難問である. これまで20年以上研究され, いくつか数値処理に基づく方法が提案されたが, 得られたモデルの次元が高いなど多くの問題点がある.

また, 航空機の構造が複雑で, 機体の質量, 姿勢, 流体力学特性, エンジン特性, 重力, 気候・天候など多くの要因を考慮して作られた数式モデルも一般的に非線形かつ非常に複雑なものとなる. 解析や設計などを効果的・効率的に行うため, 線形化や簡略化が必要である. しかし, 簡略化しすぎると, モデルの精度が落ち精密・精巧な制御が困難になる問題が生じる. より安全, より高度な制御を実現するため, 制御系の解析, 設計, シミュレーションなどにおける異なる目的や性能要求に対し, 複雑すぎず簡略化しすぎない適度なモデルが望まれる. さらに, 機種や実験・稼働条件が決まれば, それに対応するモ

デル内の各係数の値も決まる. しかし, 解析・設計・テストの各段階において, 新しい制御法や制御則をいろんな状況に対して検証する必要がある. これまでの数値的なモデル構築法では, それぞれの状況に対し, 別々に改めてモデリングを行う必要があり, コストと時間がかかる. より一般的かつ柔軟に適応できるモデリング技術が期待される.

従って, 制御系開発の効率を向上するには, 機種や稼働条件の変更に対応でき, 用途に応じて複雑さが調整できる低次元・高精度な航空機 LFR モデルの構築法が期待されている. この課題の一つの可能な解決策として, 数式処理によるモデリングを容易に思いつくが, その処理は格段に複雑になり, 既存の方法では実現不可能であるため, 新しい技法の開発が必要である.

2. 研究の目的

本研究は, これまでの成果を発展させ, 多項式行列基本変換などの数式処理の手法を用いて, 条件の変更や用途の違いに応じて複雑さが調整可能なLFRモデリングの新技法を考案し, 航空制御系の開発効率を向上させる技術を開発することを目的としている.

具体的に, 次の技術課題を解決する.

- (1) 符号係数, 変動パラメータと独立変数が混在している場合でも, そのままLFRモデルが構築できる数式処理による実現技法とその基本アルゴリズムの開発
- (2) 大規模・複雑な制御系に適用可能なサイズ分割と変数分離のLFR実現技法とそのアルゴリズムの開発
- (3) LFRモデルの次元をさらに低減できる数式処理向きの低次元化アルゴリズムを開発する.

3. 研究の方法

本研究は、独自の代数的なモデリング法に基づき、サイズ分割と変数分離の手法で、これまで複雑すぎて大規模システムに適用困難と考えられてきた数式処理によるLFRモデリングの可能性を示した。これによって、特殊ケースに対し、値の代入のみでよく再モデリングが不要、また調べたい変数・パラメータを特定したモデリングが可能であるので、各種変更への対応やモデル複雑さの調整が容易になり、航空制御系など大規模システムの開発効率の向上とコストの低減が期待できる。

なお、新しいLFRモデリング法開発の各段階において、ヨーロッパ航空技術研究グループ(GARTEUR: The Group for Aeronautical Research and Technology in Europe)が提供した研究用民間航空機モデル(RCAM: Research Civil Aircraft Model)をベンチマークとして用いて、提案したアルゴリズムの有効性と有用性の確認を行った。

4. 研究成果

本研究において、以下の主な成果を得た。
(1) 多項式行列基本変換による数式処理の方法を用いて、符号係数、変動パラメータと独立変数が混在している場合でも、それらを統一的に数式のままで処理できるLFR 実現技法とその基本アルゴリズムを開発した。具体的に、次の研究成果を得た。まず、1入出力多次元(nD)システムの伝達関数に対し、従来と全く異なる手法でLFR 実現問題の行列基本変換問題への定式化を行った上、LFR 実現が存在するための条件とその実現アルゴリズムを提案した。そして、多変数伝達関数行列の行列分解表現と行列基本変換との関係を解明することによって、多入出力の場合の行列基本変換によるLFR実現の定式化とその一般的な実現アルゴリズムを提案した。これらの結果によって、LFRを自動的に生成するプログラムの

構築が可能となった。さらに、提案した実現法で得たLFR 実現の次元(サイズ)を評価する方法とアルゴリズムを与え、それに基づきより低次元の実現を構築する技法を示した。

(2) 大規模・複雑な制御系に適用可能なサイズ分割と変数分離のLFR実現技法の構築、およびその分割・分離と再合成のための基本アルゴリズムの開発を行った。具体的に、次のような成果を得た。大きいサイズの伝達関数行列に対し、それをいくつかの適切なサイズのブロックに分割し、基本アルゴリズムでそれぞれのLFRモデルを構築したのち、全体のLFRモデルを合成するサイズ分割の実現技法とそのアルゴリズムを開発した。そして、独立変数や変動パラメータの数が多い場合、繰り返し実現法に基づき、変数と変動パラメータを自由にいくつかの組に分離・組み合わせし、別々実現したのち、統一したLFRモデルを合成する変数分離のLFR実現技法とそのアルゴリズムを開発した。ここで、特定の変数とパラメータの組み合わせを指定し、その他をただの係数とみなせば、モデルの複雑さが調整できる。

(3) LFRモデルの次元をさらに低減できる数式処理向きの低次元化アルゴリズムを開発した。具体的に、次のような成果を得た。まず、行列基本変換によるLFR実現問題の考え方を逆に適用することによって、多次元状態空間モデルとLFRモデルの低次元化問題を多変数多項式行列の基本変換問題として定式化した。これまでの多次元状態空間モデルの低次元化研究では、既知の多次元状態空間方程式またはLFRモデルの係数行列に対し、実定数行列による変換を施しているため、変換行列はブロック対角行列に制限しなければならない。これは暗黙に異なる独立変数間の可換関係が

成り立たないことを仮定し、多次元システムの低次元化問題のボトルネックとなっている。ここで与えられた新しい定式化は、変換行列を多変数多項式行列に拡大し、それによって従来できないブロック間の変換も可能となることが特徴である。次いで、低次元化するためのパターンと条件を明らかにするとともに、それぞれのパターンに対応する低次元化の技法およびそのアルゴリズムを開発した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① S. Matsushita, Li Xu, Finite Convergence of the Proximal Point Algorithm for Variational Inequality Problems, *Set-Valued and Variational Analysis*, Vol. 21, Issue 2, (pp.297-309) (2013) 査読有
DOI: 10.1007/s11228-012-0225-0
- ② L. Wang, H. Xu, Li Xu, Z. Lin, Analysis and Design of Unknown Input Observers for a Class of 2-D Nonlinear Systems, *Multidimensional Systems and Signal Processing*, published on-line first (2012.11) 査読有
DOI: 10.1007/s11045-012-0209-0
- ③ Z. Feng, Li Xu, M. Wu, J. She, H_∞ Static Output Feedback Control of Two-Dimensional Discrete Systems in FM Second Model, *Asian Journal of Control*, Vol. 14, Issue 6, (pp.1505-1513) (2012.11) 査読有
DOI: 10.1002/asjc.472
- ④ H. Fan, L. Han, C. Wen, and Li Xu, Decentralized Adaptive Output-Feedback Controller Design for Stochastic Nonlinear Interconnected Systems, *Automatica*, Vol. 48, Issue 11, (pp. 2866-2873) (2012.11) 査読有
DOI: 10.1016/j.automatica.2012.08.022
- ⑤ Z. Feng, Q. Wu, Li Xu, H_∞ control of linear multidimensional discrete systems, *Multidimensional Systems and Signal Processing*, Vol. 23, No. 3, (pp. 381-411) (2012.9) 査読有
DOI: 10.1007/s11045-011-0148-1
- ⑥ Z. Feng, Li Xu, S. Matsushita, M. Wu, Further results on sufficient LMI conditions for H_∞ static output feedback control of discrete-time systems, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 5, No. 3, (pp. 147-152) (2012.5) 査読有
- ⑦ B. Lu, Q. Wu, Li Xu, Y. Yang, Stabilizability analysis of sphere plants, *Journal of Central South University of Technology*, Vol.19, No. 9, (pp. 2561-2571) (2012.9) 査読有
- ⑧ H. Okamoto, Y. Hamate, Li Xu, H. Kuwano, The optimal geometry of a parallelized electret-based vibration energy harvester, *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, No. 6, (2012.6) 査読有
DOI: 10.1088/0964-1726/21/6/065001
- ⑨ S. Matsushita, Li Xu, Finite termination of the proximal point algorithm in Banach spaces, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol. 387, No. 2, (pp.765-769) (2012.3) 査読有
DOI: 10.1016/j.jmaa.2011.09.032
- ⑩ Li Xu, S. Yan, Z. Lin, and S. Matsushita, A New Elementary Operation Approach to Multidimensional Realization and LFR Uncertainty Modeling: the MIMO Case, *IEEE Trans. Circuits and Systems I*, Vol. 59, Issue 3, (pp.638-651) (2012.3) 査読有
DOI: 10.1109/TCSI.2011.2167262
- ⑪ M. Wu, Y. Lan, J. She, Y. He, and Li Xu, Optimal repetitive control based on two-dimensional model, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 8, No. 3, (pp.1897-1905) (2012.3) 査読有
<http://www.ijicic.org/ijicic-10-12032.pdf>
- ⑫ Y. Z. Cai, Li Xu, J. X. Gao, X. M. Xu, Study on robust H_∞ filtering in

- networked environments,
International Journal of Automation
and Computing, Vol. 8, No. 4
(pp.465-471) (2011.11) 査読有
DOI: 10.1007/s11633-011-0605-1
- ⑬ S. Matsushita, Li Xu, On convergence
of the proximal point algorithm in
Banach spaces, Proceedings of the
American Mathematical Society, Vol.
139, No.11, (pp.4087-4095) (2011.11)
査読有
DOI: 10.1090/S0002-9939-2011-10883-9
- ⑭ H. Cheng, T. Saito, S. Matsushita, Li
Xu, Realization of Multidimensional
Systems in Fornasini-Marchesini
State-space Model, Multidimensional
Systems and Signal Processing, Vol. 22,
No. 4, (pp.319-333) (2011.8) 査読有
DOI: 10.1007/s11045-010-0136-x
- ⑮ Li Xu, H. Fan, Z. Lin, Y. Xiao,
Coefficient-dependent direct-constr-
uction approach to realization of
multidimensional systems in Roesser
model, Multidimensional Systems and
Signal Processing, Vol. 22, No. 1-3, (pp.
97-129) (2011.2) 査読有
DOI: 10.1007/s11045-010-0140-1
- ⑯ S. Yan, N. Shiratori, H-J Shieh, Li Xu,
A General State-Space Representation
of n-Variable Bilinear Transformation,
Signal Processing, Vol. 91, No. 2, (pp.
185-190) (2011.2) 査読有
DOI: 10.1016/j.sigpro.2010.06.016
- ⑰ J. Liu, Y. Xiao, J. Sun, Li Xu, Analysis
of Online Secondary-Path Modeling
with Auxiliary Noise Scaled by
Residual Noise Signal, IEEE
Transactions on Audio, Speech, and
Language Processing, Vol. 18, Issue 8
(pp. 1978-1993) (2010.11) 査読有
DOI: 10.1109/TASL.2010.2040789
- ⑱ Z. Feng, Li Xu, M. Wu, Y. He,
Delay-dependent robust stability and
stabilization of uncertain 2-D discrete
systems with time-varying delays, IET
Control Theory & Applications, Vol. 4,
Issue 10, (pp. 1956-1971) (2010.10) 査
読有
- DOI: 10.1049/iet-cta.2009.0284
- ⑲ Li Xu, S. Yan, A New Elementary
Operation Approach to
Multidimensional Realization and LFR
Uncertainty Modeling: The SISO Case,
Multidimensional Systems and Signal
Processing, Vol.21, No. 4, (pp. 343-372)
(2010.6) 査読有
DOI: 10.1007/s11045-010-0114-3
- [学会発表] (計 17 件)
- ① H. Fan, M. Lu, L. Li, J. Yuan, Li Xu,
Image Registration based on a Novel
2-D Adaptive Filter Algorithm, The
12th International Conference on
Control, Automation, Robotics and
Vision (ICARCV2012), Guangzhou,
China (2012.12) 査読有
- ② Y. Tian, F. Zhang, S. Yan, Li Xu,
Invariance of Second-Order Modes of
2-D Digital Filters under 2-D
Frequency Transformation, The 12th
International Conference on Control,
Automation, Robotics and Vision
(ICARCV2012), Guangzhou, China
(2012.12) 査読有
- ③ S. Matsushita, Li Xu, Some remarks on
finite termination of projection
methods, The third Asian conference
on Nonlinear Analysis and
Optimization (NAO-Asia2012), Matsue,
Japan (2012.9) 査読有
- ④ Y. Saito, S. Matsushita, Li Xu, A New
Procedure for Low-Order Realization
of n-D Systems in Fornasini-
Marchesini State-Space Model,
Proceedings of the SICE Annual
Conference 2012 (SICE2012), pp.
861-865, Akita, Japan (2012.8) 査読有
- ⑤ H. Fan, Li Xu, K. Uemura, S.
Matsushita, An Iterative Procedure for
Multidimensional Realization By LFT
Techniques, The 7th IFAC Symposium
on Robust Control Design
(ROCOND'12), Aalborg, Denmark
(2012.6) 査読有
- ⑥ Q. Wu, Li Xu, M. Mansour, Optimal
Solutions to Robust Stabilization

- Problem for a Class of Systems with Parametric Uncertainty, The 7th IFAC Symposium on Robust Control Design (ROCOND'12), Aalborg, Denmark (2012.6) 査読有
- ⑦ S. Yan, Li Xu, Y. Xiao, Order Reduction for Roesser State-Space Model Based on Elementary Operations, The 2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2012), Seoul, Korea (2012.5) 査読有
- ⑧ S. Matsushita, Li Xu, Asymptotic convergence analysis of the proximal point algorithm for metrically regular mapping, Proceedings of the 5th International Workshop on Computational Intelligence & Applications, pp. 223-226, Hiroshima, Japan (2011.9) 査読有
- ⑨ S. Yan, Li Xu, Simple Proof for Invariance of Second-Order Modes of 2-D Separable Denominator Digital Filters under 1-D Frequency Transformation, The 3rd International Conference on Information Science and Engineering (ICISE2011), Yangzhou, China (2011.9) 査読有
- ⑩ H. Xu, Z. Lin, A. Makur, Li Xu, Asymptotic Unknown Input Observers for 2-D Systems, The 7th International Workshop on Multidimensional (nD) Systems (nDS 2011), Poitiers, France (2011.9) 査読有
- ⑪ J. Lu, Y. Cai, Li Xu, X. M. Xu, The Optimal Filtering for a Class of Local Strongly Coupled Systems, Proc. CCC2011, pp.1372-1376, Yantai, China (2011.7) 査読有
- ⑫ Li Xu, S. Yan, S. Matsushita and Z. Lin, Roesser model realization of MIMO n-D systems by elementary operations, Proc. IEEE ISCAS2011, pp.1243-1246, Rio de Janeiro, Brazil (2011.5) 査読有
- ⑬ Z. Feng, Li Xu, Y. Anazawa, Sufficient LMI conditions for H_∞ static output feedback control of 2-D systems, proc. of 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV2010), Singapore, (2010.12) 査読有
- ⑭ Z. Y. Feng, Li Xu, H_∞ Static Output Feedback Controller Design for Two-Dimensional Discrete Systems in Roesser Model, Proc. of the 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Yokohama, Japan (2010.9) 査読有
- ⑮ S. Yan, Li Xu, Symbolic Implementation of the New Elementary Operation Approach for Multidimensional Realization and LFR Uncertainty Modeling, Proc. of the 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Yokohama, Japan (2010.9) 査読有
- ⑯ B. Lu, Q. Wu, Li Xu, Robust stabilizability analysis with sphere plants, Proc. CCC2010, Beijing, China (2010.7) 査読有
- ⑰ N. Shiratori, S. Yan, H-J. Shieh, Li Xu, State-space Formulation of n-variable Bilinear Transformation for n-D Systems, Proc. IEEE ISCAS2010, Paris, France (2010.5) 査読有
- [図書] (計 0 件)
- [その他]
ホームページ等
<http://web.sc.eis.akita-pu.ac.jp/~xuli/publist.html>
6. 研究組織
(1) 研究代表者
徐 粒 (XU LI)
秋田県立大学・システム科学技術学部・教授
研究者番号： 40252324
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし